断奶仔猪血清氨基酸含量和生化参数对不同蛋白质水平饲粮的动态响应

王利剑[1,2] 崔志杰[1,2,3] 何流琴[1,2] 姚继明[4*] 吴 飞[1,2] 韩 慧[1,2] 范文君[4] 李铁军[1,4,5*]

（1.中国科学院亚热带农业生态所亚热带农业生态过程重点实验室，湖南省畜禽健康养殖工程技术研究中心，农业部中南动物营养与饲料科学观测试验站，长沙 410125；2.中国科学院大学，北京 1000039；3.湘潭大学，湘潭 411005；4.广东省旺大集团猪清洁饲料技术研发院士工作站，广州 510663；5.湖南畜禽安全生产协同创新中心，长沙 410128）

摘 要：本文旨在研究断奶仔猪血清氨基酸含量和生化参数对不同蛋白质水平饲粮的动态响应。选取18头35日龄平均体重为（10.0±1.0） kg三元（杜×长×大）杂交断奶阉公猪，随机分为3组（每组6个重复，每个重复1头猪），并分别饲喂蛋白质水平为14%（LP）、17%（MP）和20%（HP）的饲粮。每头试验猪安装颈动脉血管插管，术后恢复5 d，于第6～8天正式试验。每天采食前，采食后30、60、120、180和300 min连续采集颈动脉血液10 mL，分别检测血清游离氨基酸含量和相关生化指标。结果表明：不同蛋白质水平饲粮对仔猪采食前后各时间点血清中游离赖氨酸（Lys）、蛋氨酸（Met）、苏氨酸（Thr）、色氨酸（Trp）、天冬氨酸（Asp）、丝氨酸（Ser）、甘氨酸（Gly）和谷氨酸（Glu）含量影响均不显著（*P*>0.05）。但血清中Lys、Met、Thr、Trp含量随饲粮蛋白质水平的降低而升高。HP组仔猪采食前后各时间点血清游离氨基酸[缬氨酸（Val）、异亮氨酸（Ile）、精氨酸（Arg）]和尿素含量显著高于MP和LP组（*P*<0.05）。采食后120~300 min HP组血清Leu含量显著高于LP组（*P*<0.05）。采食后各时间点 LP 组血清总蛋白（TP）、白蛋白（ALB）含量及碱性磷酸酶（ALP）活性显著高于HP和MP组（*P*<0.05）。各组仔猪采食后血清游离氨基酸含量和相关生化指标随时间变化无显著差异（*P*>0.05）。综上所述，断奶仔猪饲粮在平衡4种氨基酸（Lys、Met、Thr、Trp）的基础上，常规饲粮蛋白质水平降低3个百分点，血清游离Val、Ile、Arg含量显著降低，但对血清中其他氨基酸和相关生化指标无显著影响；而蛋白质水平降低 6 个百分点，血清游离 Leu 和尿素含量显著降低，TP、ALB含量和ALP活性显著升高，但对血清中其他氨基酸和相关生化指标的影响不显著。

关键词：蛋白质水平；断奶仔猪；氨基酸；生化指标

中图分类号：S828

近年来随着养猪业集约化发展，其所产生的粪污排放和饲料原料浪费问题也日趋严重。猪饲料中50%以上的氮以粪和尿素的方式排出体外，大部分被氧化成硝酸盐流入江河湖泊，进一步造成更广泛

收稿时间：2016－07－04

基金项目：国家973课题（2013CB127301）；国家科技支撑计划课题（2013BAD21B04）

作者简介：王利剑（1989－），女，贵州兴义人，硕士研究生，研究方向为动物营养与饲料科学。E-mail: wanglijian27@163.com

*通信作者：姚继明，畜牧师，E-mail: wangdayaojiming@163.com；李铁军，研究员，博士生导师，E-mail: tjli@isa.ac.cn

的环境污染[1]。如今解决氮的过量排放和减少饲粮蛋白质原料的浪费是养猪业面临的重大课题。不少学者认为在提高或不影响生产性能的情况下，可通过降低饲粮蛋白质水平补充合成氨基酸，提高饲料利用率和减少对环境的污染[2-3]。据研究，饲粮蛋白质水平降低后，其限制性氨基酸的种类增多、限制性程度增大[4]。因此，在应用"氨基酸平衡模式"配制低蛋白质水平饲粮时，需补充人工合成的赖氨酸（Lys）、蛋氨酸（Met）、苏氨酸（Thr）、色氨酸（Trp）等限制性氨基酸以满足动物需要。本研究通过颈动脉血管插管技术，研究了不同蛋白质水平饲粮对断奶仔猪血清氨基酸含量和生化参数的动态影响，实时监控断奶仔猪采食饲粮前后血液氨基酸和生化指标的变化，以期为降低饲粮蛋白质水平、提高饲料利用率和减少环境污染提供科学参考。

1　材料与方法

1.1　试验设计

选取 18 头 35 日龄平均体重为（10.0±1.0） kg 三元(杜×长×大)杂交断奶阉公仔猪（购自湖南新五丰永安分公司），随机分为 3 个组，每组 6 个重复，每个重复 1 头猪，单栏饲养，分别饲喂蛋白质水平为 14%（LP）、17%（MP）和 20%（HP）的饲粮。饲粮配制参照 NRC（2012）[5]推荐的断奶仔猪营养需要标准，饲粮的蛋白质来源一致，且平衡 Lys、Met、Thr、Trp 4 种氨基酸水平，并保持该 4 种氨基酸含量和能量水平相同，饲粮组成及营养水平与本项目组前期研究[6]一致。

1.2　试验材料和仪器

氨基酸分析仪（L–8800，日本），XC4 型全自动血液生化分析仪（Beckman 公司，美国），TG16W 微量高速离心机（中国），磺基水杨酸（中国）。

1.3　饲养管理和颈动脉血管插管手术

仔猪饲养于通风良好、温度为（23±1） ℃的干净猪舍内，自由采食和饮水，分别饲喂各自不同蛋白质水平饲粮 5 d 后，在第 6 天空腹（禁食 12 h，自由饮水）称重，按组分别对每头试验仔猪实施颈动脉血管插管手术，术前先注射阿托品（0.05 mg/kg，浙江制药股份公司新昌制药厂），15 min 后肌肉注射舒泰 50（0.1 mg/kg，法国维克），10～15 min 后动物处于麻醉状态，对仔猪颈部右侧消毒、刮毛。颈动脉血管插管手术方法参照李铁军等[7]和 Morris 等[8]的方法。

1.4　术后管理

手术进行过程中手术室保持 25 ℃左右。术后仔猪单栏饲喂于代谢笼中，禁食 1 d，仅饲喂 5%葡萄糖。术后第 2 天饲喂相应组的试验饲粮，自由采食和饮水，并在每天 08:00、16:00 和 23:00，用无菌注射器从血管插管处抽取少量新鲜血液，后灌注 10 mL 的肝素钠溶液（400 IU/mL），以确保插管畅通。术后恢复 5 d（仔猪正常采食），开始正式试验。

1.5　样品的采集和保存

术后第 6～8 天，每次喂料前以及采食后 30、60、120、180 和 300 min 连续采集血液样品。每次每头用 10 mL 注射器采取 10 mL 血液于 10 mL 离心管中，4 ℃下 3 000 r/min 离心 10 min，取上清液分装至 1.5 mL 离心管中，保存于－80 ℃冰箱，用于血清氨基酸含量和生化指标测定。

1.6 测定指标

1.6.1 血清游离氨基酸含量测定

取 1 mL 血清加入 1 mL 8%的磺基水杨酸漩涡混匀，静置过夜（3 ℃），12 000 r/min 离心 15 min（4 ℃），取上清液用过滤器（孔径 0.22 μm）过滤，取 500 μL 过滤液于氨基酸分析仪进行氨基酸分析。

1.6.2 血清生化指标分析

用全自动生化分析仪测定刚分离出的血清中尿素、总蛋白（total protein,TP）、白蛋白（albumin,ALB）、免疫球蛋白 M（immunoglobulin M,IgM）和免疫球蛋白 G（immunoglobulin G,IgG）含量以及碱性磷酸酶（alkaline phosphatase,ALP）活性。

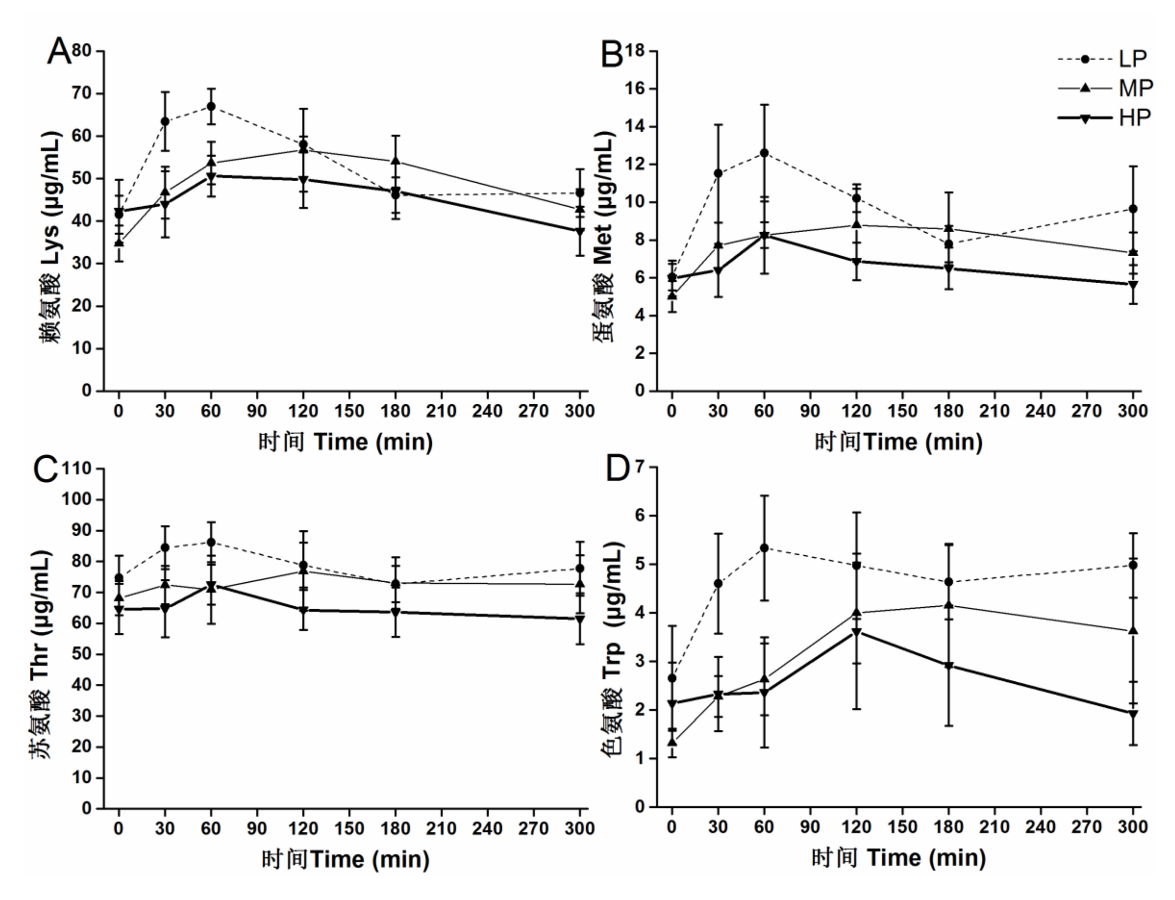
1.7 统计分析

采用 SPSS 21.0 软件中的单因素方差分析（one-way ANOVA）进行统计分析，差异显著性用 Duncan 氏法进行多重比较，以 $P<0.05$ 作为差异显著性判断标准。

2 结 果

2.1 血清必需氨基酸 Lys、Met、Thr 和 Trp 对不同蛋白质水平饲粮的动态响应

本研究是在本项目组前期研究的基础上进行的，前期研究表明，在满足 Lys、Met、Thr、Trp 需要量的条件下，断奶仔猪（10～30 kg 阶段）饲粮蛋白质水平由 20%降低至 17%，不影响平均日增重、平均日采食量和饲料转化率，但降低至 14%，生长性能则受到显著影响[9]。由图 1 可知，降低蛋白质水平，补充 4 种必需氨基酸（Lys、Met、Thr 和 Trp），仔猪采食前后各时间点血清中游离 Lys、Met、Thr、Trp 含量无显著差异（$P>0.05$）。采食后，各组之间随着时间的延长，血清游离 Lys、Met、Thr、Trp 含量呈现先上升后下降最后趋于平稳的趋势，但随时间延长变化不显著（$P>0.05$）。



字母 a 代表同一时间 HP 和 MP 组差异显著（*P*<0.05），字母 b 代表同一时间 HP 和 LP 组差异显著（*P*<0.05），字母 c 代表同一时间 MP 和 LP 组差异显著（*P*<0.05），无字母标注表示差异不显著（*P*>0.05）。下图同。

Letter a means significant difference between HP and MP group (*P*<0.05), b means significant difference between HP and LP group (*P*<0.05), c means significant difference between MP and LP group (*P*<0.05), and no letter superscripts mean no significant difference （*P*>0.05） . The same as below.

图 1　不同蛋白质水平饲粮对断奶仔猪血清游离 Lys、Met、Thr 和 Trp 含量的影响

Fig.1　Effects of diets with different protein levels on contents of free Lys, Met, Thr and Trp in serum of weaned piglets

2.2　血清氨基酸缬氨酸（Val）、异亮氨酸（Ile）、亮氨酸（Leu）和精氨酸（Arg）对不同蛋白质水平饲粮的动态响应

由图 2 可知，各组血清游离支链氨基酸（Val、Ile、Leu）和 Arg 含量随饲粮蛋白质水平的降低而降低。采食后，HP 组血清中游离 Val 和 Ile 含量显著高于 MP 和 LP 组（*P*<0.05），MP 组 Val 含量在采食后 120、180 min 与 Ile 含量在采食后 180 min 显著高于 LP 组（*P*<0.05），其余时间点 MP 和 LP 组无显著差异（*P*>0.05）。采食前，HP 组的 Leu 含量显著高于 MP 和 LP 组（*P*<0.05）；采食后 30、60 min，LP 组和 MP 组 Leu 含量有上升趋势，HP 组（24.34 和 26.70 μg/mL）、MP 组（18.42 和 21.16 μg/mL）和 LP 组（22.32 和 23.39 μg/mL）间无显著差异（*P*>0.05）；采食后 120 min 及以后各时间点 LP 组 Leu 含量显著低于 HP 组（*P*<0.05）；采食后 300 min HP 组 Leu 含量显著高于 MP 组（*P*<0.05），其余各时

间点 LP 与 MP 组 Leu 含量无显著差异（*P*>0.05）。采食前，HP 组 Arg 含量显著高于 LP 组（*P*<0.05），HP 与 MP 组无显著差异(*P*>0.05)。采食后 30～180 min，HP 组 Arg 含量显著高于 MP 和 LP 组(*P*<0.05)，300 min 时 3 组 Arg 含量无显著差异（*P*>0.05）。各组不同时间点之间，血清游离 Val、Ile、Leu 和 Arg 含量随时间变化差异不显著（*P*>0.05）。

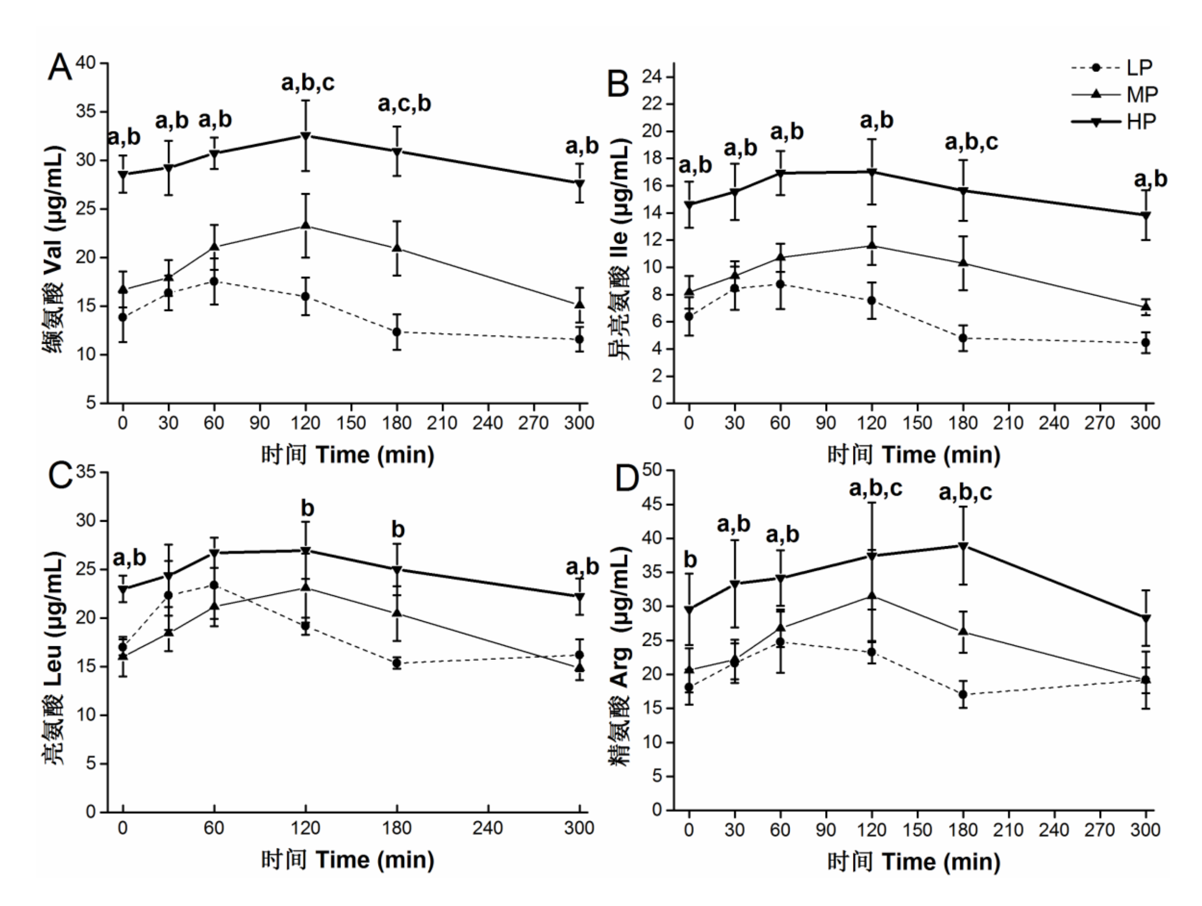


图2　不同蛋白质水平饲粮对断奶仔猪血清游离Val、Ile、Leu和Arg含量的影响

Fig.2　Effects of diets with different protein levels on contents of free Val, Ile, Leu and Arg in serum of weaned piglets

2.3　血清非必需氨基酸脯氨酸（Pro）、天冬氨酸（Asp）、丝氨酸（Ser）、甘氨酸（Gly）、半胱氨酸（Cys）和谷氨酸（Glu）含量对不同蛋白质水平饲粮的动态响应

由图 3 可知，除游离 Pro 和 Cys 外，各时间点各组之间仔猪血清游离 Asp、Ser、Gly 和 Glu 含量均无显著差异（*P*>0.05）。Pro 含量在采食前，HP 组（20.34 μg/mL）显著高于 MP（10.81 μg/mL）和 LP 组（13.90 μg/mL）（*P*<0.05），采食后 180 min Pro 含量显著高于 LP 组（*P*<0.05）；其余各时间点，HP 组与 MP 组、MP 组与 LP 组间无显著差异（*P*>0.05）。除游离 Cys 和 Gly 外，非必需氨基酸 Asp、Ser、Pro 和 Glu 含量随饲粮蛋白质水平降低而降低，Cys 和 Gly 含量随饲粮蛋白质水平降低而升高。每组不同时间点之间，随时间变化血清非必需氨基酸 Pro、Asp、Ser、Gly、Cys 和 Glu 含量无显著差异（*P*>0.05）。

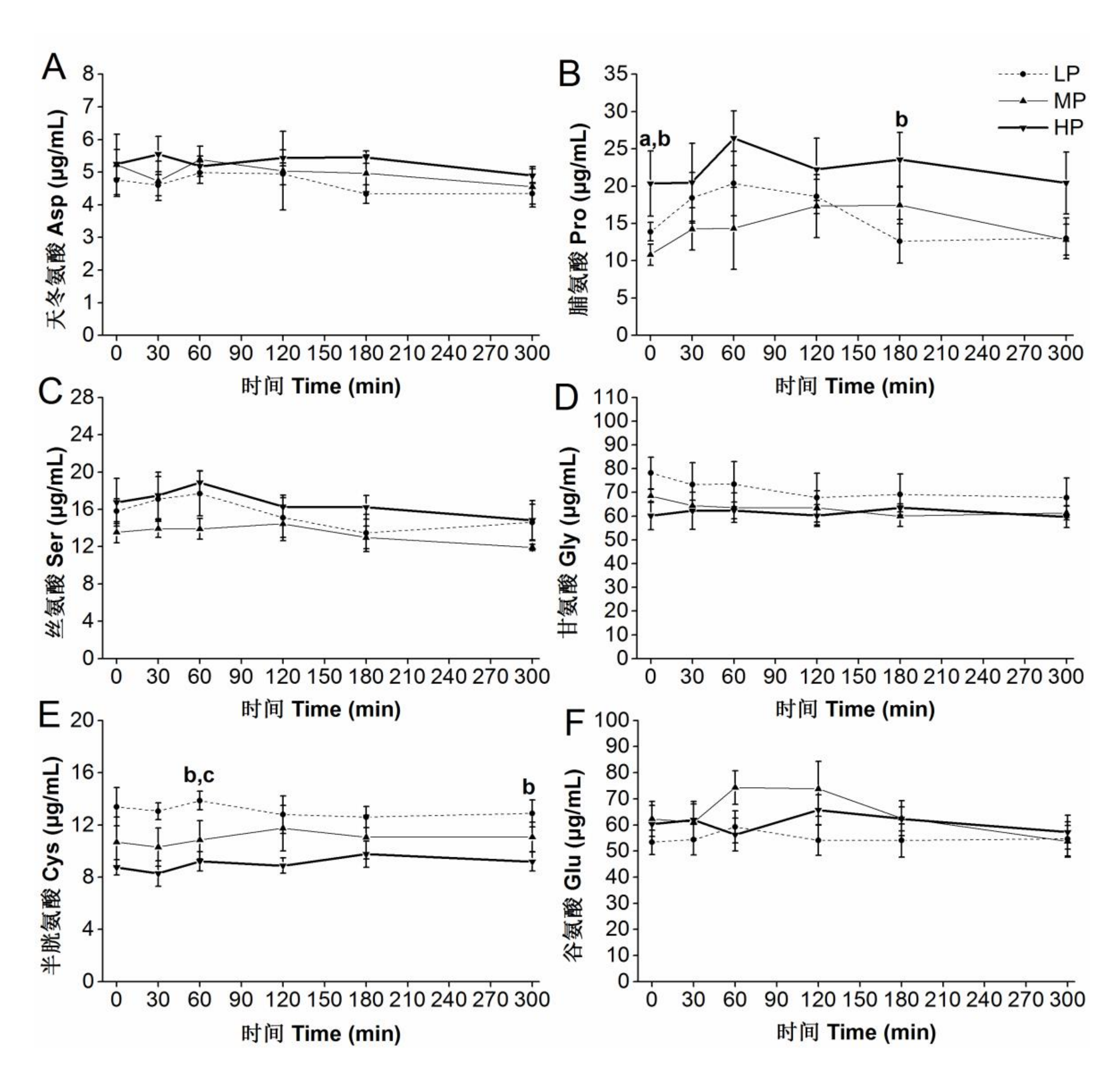


图 3　不同蛋白质水平饲粮对断奶仔血清游离 Pro、Asp、Ser、Gly、Cys 和 Glu 含量的影响

Fig.3　Effects of diets with different protein levels on contents of free Pro, Asp, Ser, Gly and Glu in serum of weaned piglets

2.4　血清生化参数对不同蛋白质水平饲粮的动态响应

由图 4－A、4－B 和 4－C 可知，不同时间点 LP 组 TP、ALB 含量和 ALP 活性均高于其他 2 组。除采食前外，在其他时间点 LP 组血清 TP 含量显著高于 HP 和 MP 组（P<0.05），MP 和 HP 组无显著差异（P>0.05）。血清 ALB 含量在采食后 120、180 和 300 min，LP 组（25.96、25.36 和 25.60 g/L）显著高于 HP 组（22.52、22.86 和 22.54 g/L）和 MP 组（22.98、22.86 和 22.54 g/L）（P<0.05）；其余时间点，3 组之间差异不显著（P>0.05）。采食后 60 min 以及之后的时间段，LP 组血清 ALP 活性显著高于 HP 组（P<0.05）；采食后 60 和 180 min，LP 组血清 ALP 活性显著高于 MP 组（P<0.05）；其余时间点，各组无显著差异（P>0.05）。血清 ALP 活性随饲粮蛋白质水平降低而升高。每组不同时间点之间血清 TP、ALB 含量和 ALP 活性随时间变化均差异不显著（P>0.05）。

由图 4－D 可知，各时间点之间，HP 组血清尿素含量显著高于 LP 组（$P<0.05$）；采食前及采食后 30 和 300 min，HP 组显著高于 MP 组（$P<0.05$）；采食后 120～300 min，MP 组显著高于 LP 组（$P<0.05$）。每组不同时间点之间血清尿素含量随时间的变化无显著差异（$P>0.05$）。由图 4－E 和 4－F 可知，采食后 120 min，LP 组血清 IgG 和 IgM 含量显著低于 HP 组（$P<0.05$）；其余时间点，各组 IgG 和 IgM 含量无显著差异（$P>0.05$）。每组不同时间点之间血清 IgM 和 IgG 含量随时间变化无显著差异（$P>0.05$）。

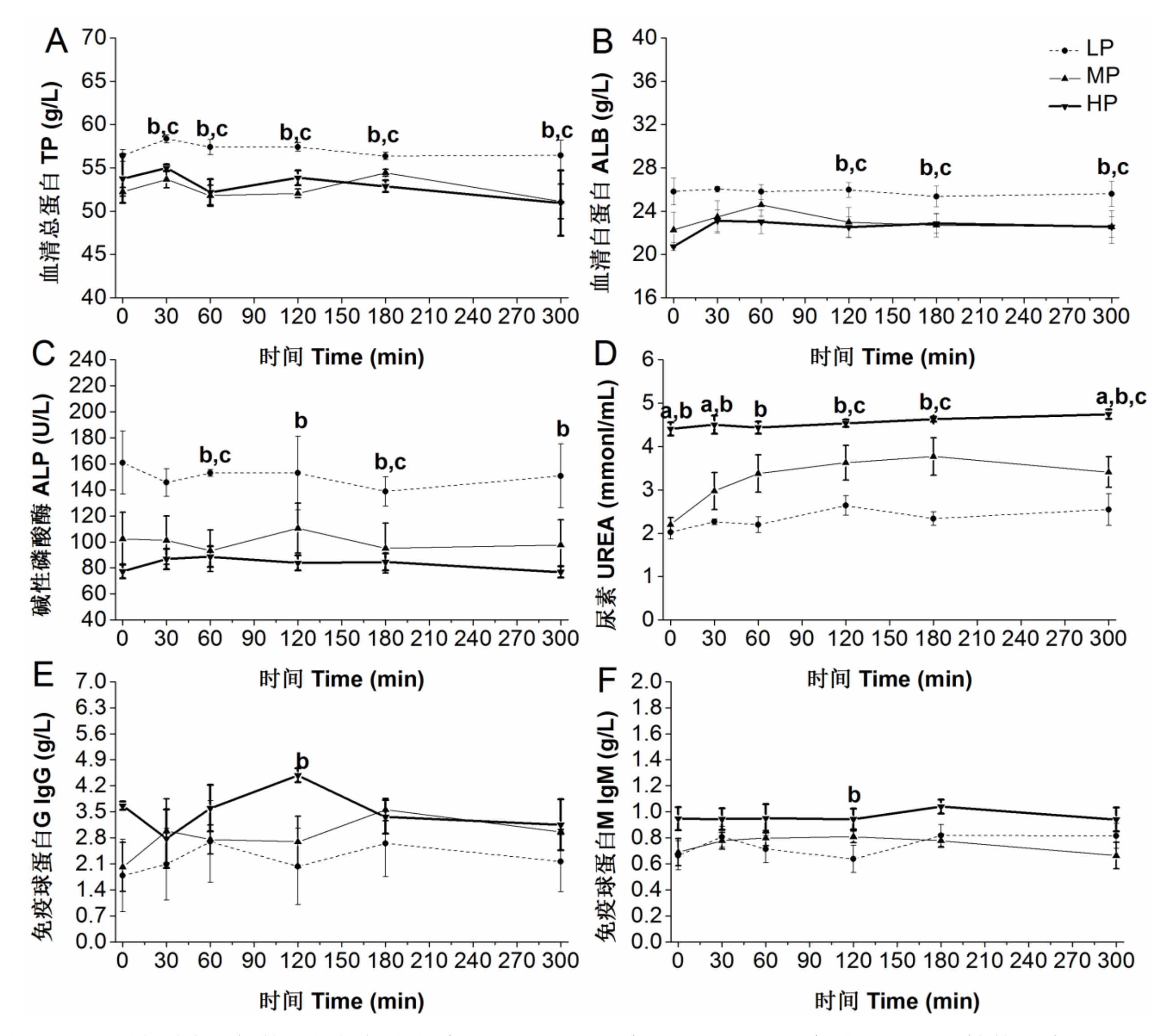


图 4　不同蛋白质水平饲粮对断奶仔猪血清 TP、ALB、尿素、IgG 和 IgM 含量及 ALP 活性的影响

Fig.4　Effects of diets with different protein levels on contents of TP, ALB, urea, IgG, IgM and ALP activity in serum of weaned piglets

3　讨　论

3.1　断奶仔猪血清 Lys、Met、Thr 和 Trp 含量对不同蛋白质水平饲粮的动态响应

有研究表明降低饲粮蛋白质水平，同时补充 Lys、Met、Thr 和 Trp 可以提高饲粮蛋白质的利用率，减少粪尿氮的排放[10-11]。本研究通过降低 3 和 6 个百分点的饲粮蛋白质水平，应用“氨基酸平衡模式”

补充合成的 Lys、Met、Thr 和 Trp 研究血清游离氨基酸含量变化规律。试验结果发现降低 3 和 6 个百分点的饲粮蛋白质水平对血清 Lys、Met、Thr 和 Trp 含量无显著影响，且补充的这 4 种氨基酸含量随饲粮蛋白质水平的降低而升高。但当饲粮蛋白质水平降低 6 个百分点后，断奶仔猪食后 0～120 min，血清游离 Lys、Met、Thr 和 Trp 含量高于其他 2 组，这与邓敦等[12]研究结果一致。这可能是由于随着饲粮蛋白质水平降低，饲粮中补充的 Lys、Met、Thr 和 Trp 这 4 种氨基酸含量增加，仔猪采食饲粮中合成氨基酸进入胃肠道后不需要蛋白酶的分解，直接被胃肠道吸收。这表明适当降低蛋白质水平，补充满足仔猪机体所需的合成氨基酸，能在一定程度上提高断奶仔猪胃肠道对 Lys、Met、Thr 和 Trp 的吸收。

3.2　断奶仔猪血清 Val、Ile、Leu 和 Arg 含量对不同蛋白质水平饲粮的动态响应

血清游离氨基酸含量在一定程度上可以反映动物氨基酸的需要量，当饲粮氨基酸含量不足时，血清游离氨基酸含量将处于较低状态，随着进食，血清中游离氨基酸将迅速积累[13]。当饲粮蛋白质水平降低 3 或 6 个百分点时，测得各时间点仔猪血清游离支链氨基酸（Val、Ile、Leu）和 Arg 含量显著低于饲喂 20%蛋白质水平的饲粮。这表明降低饲粮蛋白质水平，断奶仔猪血清中必需氨基酸含量将会受到显著影响。这可能是由于降低饲粮蛋白质水平引起饲粮所提供的 Val、Ile、Leu 和 Arg 必需氨基酸不能满足仔猪生长需求[12]。另外这也说明合成氨基酸与饲粮蛋白质本身提供的必需氨基酸是有区别的，因此，合成氨基酸不可完全替代饲粮蛋白质本身分解的氨基酸。支链氨基酸 Val、Leu、Ile 与机体蛋白质和能量代谢有密切关系，Leu 通过雷帕霉素靶蛋白（mTOR）通路调节机体能量和蛋白质的代谢，促进动物生长和健康[14-15]。据相关研究表明降低蛋白质水平补充支链氨基酸能够改善仔猪生产性能，提高采食量和肌肉生长[16]。本研究发现降低饲粮蛋白质水平并补充 Lys、Met、Thr、Trp 4 种必需氨基酸，血清中游离的支链氨基酸含量依然较低，因此，这一结果提示我们饲粮在补充 Lys、Met、Thr、Trp 前提下，同时适量补充支链氨基酸才能满足仔猪生长和健康的需要。

3.3　断奶仔猪血清 Pro、Asp、Ser、Gly、Cys 和 Glu 含量对饲粮不同蛋白质水平的动态响应

饲粮蛋白质水平降低 3 或 6 个百分点，对食后各时间点仔猪血清游离非必需氨基（除 Pro 和 Cys 外）含量无显著影响。血清游离非必需氨基酸含量随时间变化无显著变化，但各组仔猪血清中非必需氨基酸（除 Gly 和 Cys 外）含量随饲喂饲粮蛋白质水平的降低而降低。研究表明，当饲粮提供的非必需氨基酸不能满足动物机体需求时，动物机体能通过一系列转氨反应合成非必需氨基酸以满足动物的需求[17-18]。另外，本试验中降低蛋白质水平造成血清中 Pro 含量降低，但可提高 Gly 和 Cys 含量。这一结果可能是由于 Pro 作为判断肠道是否应激和帮助蛋白质分解的一个重要指标，它对维持断奶仔猪健康生长非常重要[19-23]，而降低蛋白质水平会直接引起内源 Pro 的不足，进一步影响仔猪的正常生长发育。血清中 Gly 和 Cys 对机体脂肪代谢和解毒作用有重要作用[24-26]，降低饲料蛋白质水平本身对断

奶仔猪是一个应激，为了满足机体需求，自身上调血清中 Gly 和 Cys 含量，以期减缓饲粮蛋白质水平不足造成的影响。不过，断奶仔猪血清中 Pro、Gly 和 Cys 对降低蛋白质水平的不同响应机理还需进一步研究。

3.4　断奶仔猪血清生化参数对不同蛋白质水平饲粮的动态响应

血清生化指标的变化是机体新陈代谢机能和组织细胞通透性变化的综合反映。血清TP在一定程度上代表了饲粮中蛋白质的营养水平及动物对蛋白质的消化吸收程度。ALB由肝实质细胞合成，是血清中含量最多的蛋白质，占血清总蛋白质的40%～60%，合成效率受饲粮中蛋白质水平的影响[27]。当TP和ALB含量升高时蛋白质代谢旺盛，饲料利用率提高。研究表明降低鸡和鹅[28-29]饲粮蛋白质水平3个百分点，血清中TP含量显著上升，对ALB含量无显著影响。这一结果与本试验结果类似。当饲粮蛋白质水平降低6个百分点时，血清中TP和ALB含量显著增加，这表明饲粮降低6个百分点的蛋白质水平可以提高仔猪对饲粮中蛋白质水平的消化吸收程度，同时有助于提高肝脏白蛋白的合成能力。

血清中的尿素是蛋白质的最终产物，反映了体内蛋白质的代谢情况，与饲粮中氮的利用率呈反比[30-31]。同时氮营养素在不同组织器官中的代谢主要通过谷氨酰胺、丙氨酸和尿素等氮代谢关键产物进行协同整合[32-35]。本试验数据显示血清中尿素的含量随饲粮蛋白质水平降低而降低，表明适当降低饲粮蛋白质水平可以提高饲料中氮的利用率，从而减少氮的排放量。同时这一结果与郑春田等[36]、张敏等[37]和 Toledo 等[38]研究结果一致。

ALP是消化代谢的关键酶，能产生磷酸，与钙生成磷酸钙沉淀，参与骨骼钙化过程，是动物成骨细胞活动的重要指标[39]。本研究发现，断奶仔猪饲喂14%蛋白质水平饲粮，血清ALP活性显著偏高。这可能是由于饲粮蛋白质降低6个百分点时，将会造成肝功能异常，从而引发相关疾病。因有研究报道人体患有阻塞性黄疸、原发性肝癌、继发性肝癌、胆汁淤积性肝炎等肝功能疾病时，肝细胞过度制造ALP，引起血清中的ALP活性偏高[40]。

体液免疫是动物机体抵抗疾病的重要机制，这种免疫力取决于免疫球蛋白质的种类和数目[41]。机体受病原体感染后，IgM最先与病原体结合，溶解病原体。IgG有抗菌和抗病毒作用[42]。本研究发现，饲粮降低蛋白质水平6个百分点，仔猪食后120 min血清IgG和IgM含量显著降低。其他时间点对IgG和IgM含量没有影响，与侯永清等[43]研究蛋白质水平为20%和18%饲粮对早期断奶仔猪血清IgG含量影响的结果类似。这表明降低饲粮蛋白质水平，对仔猪IgG和IgM的含量基本无影响，所以适量降低蛋白质水平不会降低仔猪的免疫能力，但对仔猪食后120 min血清IgG和IgM含量降低的现象还需进一步研究。

4　结　论

在本试验条件下，饲粮蛋白质降低 3 个百分点，同时补足 Lys、Met、Thr 和 Trp，不影响血清该类氨基酸、Leu 以及非必需氨基酸 Asp、Ser、Gly、Cys 和 Glu 的含量；同时不影响血清 IgM、IgG、

尿素、TP、ALB 含量以及 ALP 活性；但显著降低血清必需氨基酸 Val、Ile 和 Arg 含量。饲粮蛋白质降低 6 个百分点，同时补足 Lys、Met、Thr 和 Trp 必需氨基酸时，显著降低血清必需氨基酸 Leu 和尿素含量，提高血清 TP、ALB 含量和 ALP 活性。因此，在考虑生长性能不受影响的条件下，适量降低断奶仔猪饲粮蛋白质水平（17%），除需满足 Lys、Met、Thr 和 Trp 外，还需针对 Val、Leu、Ile 和 Arg 需要量进行考究，这样才能进一步为提高饲料利用率和减少氮的排放量提供科学指导。

致谢：感谢中国科学院亚热带农业生态研究所公共技术服务中心对本文血清氨基酸含量及生化参数检测提供的帮助。

参考文献：

[1] 张乃锋,邓柏林,张永发,等.低排放日粮对育肥猪及粪便氮磷排放量的影响[J].猪业科学,2013(6):74–76.

[2] ROTZ C A.Management to reduce nitrogen losses in animal production[J].Journal of Animal Science,2004,82(13S):E119–E137.

[3] KERR B J.Nutritional strategies for waste reduction management:nitrogen[C]//LONGENECKER J B,SPEARS J W.Proceedings of new horizons in animal nutrition and health.Carolina:The Institute of Nutrition,University of North Carolina,1995.

[4] HAHN J D,BAKER D H.Optimum ratio to lysine of threonine,tryptophan,and sulfur amino acids for finishing swine[J].Journal of Animal Science,1995,73(2):482–489.

[5] National Research Council.Nutrient requirements of swine[M].11th ed.Washington,D.C.:The National Academies Press,2012.

[6] 崔志杰,王利剑,吴飞,等.饲粮粗蛋白质水平对断奶仔猪胃肠分泌及血清激素水平的影响[J].动物营养学报,2015,27(12):3689–3698.

[7] 李铁军,黄瑞林,印遇龙.不同日粮对猪血液红细胞压容积及其血流量的影响[J].广西农业生物科学,2003,22(3):159–164.

[8] MORRIS D,LADIZINSKY D,ABOULJOUD M.Successful internalization of a chronic biliary cutaneous fistula after liver transplantation:deepithelializing the fistula tract[J].Journal of Gastrointestinal Surgery,2007,11(4):538–541.

[9] 伍力.胃肠道对不同赖氨酸与粗蛋白比例日粮的感应及调节[D].博士学位论文.北京:中国科学院大学,2016.

[10] DONATO D C Z,SAKOMURA N K,SILVA E P,et al.Manipulation of dietary methionine+cysteine and threonine in broilers significantly decreases environmental nitrogen excretion[J].Animal,2016,10(6):903–910.

[11] HUYEN N T,DESRUES O,ALFERINK S J J,et al.Inclusion of sainfoin (*Onobrychis viciifolia*) silage in dairy cow rations affects nutrient digestibility,nitrogen utilization,energy balance,and methane emissions[J].Journal of Dairy Science,2016,99(5):3566–3577.

[12] 邓敦,李铁军,孔祥峰,等.日粮蛋白水平对生长猪生产性能和氮平衡的影响[J].广西农业生物科学,2007,26(2):137–143.

[13] ZIMMERMA R A,SCOTT H M.Interrelationship of plasma amino acid levels and weight gain in the chick as influenced by suboptimal and superoptimal dietary concentrations of single amino acids[J].Journal of Nutrition,1965,87(1):13–18.

[14] DUAN Y H,LI F N,LI Y H,et al.The role of leucine and its metabolites in protein and energy metabolism[J].Amino Acids,2016,48(1):41–51.

[15] DUAN Y H,LI F N,LIU H N,et al.Nutritional and regulatory roles of leucine in muscle growth and fat reduction[J].Frontiers in Bioscience,2015,20(4):796–813.

[16] ZHENG L F,WEI H K,CHENG C S,et al.Supplementation of branched-chain amino acids to a reduced-protein diet improves growth performance in piglets:involvement of increased feed intake and direct muscle growth-promoting effect[J].British Journal of Nutrition,2016,115(12):2236–2245.

[17] 伍国耀,武振龙,戴兆来,等.猪对“非必需氨基酸”的营养需要[J].饲料工业,2013,34(16):60–64.

[18] SHREERAM S,RAMESH S,PUTHAN J K,et al.Age associated decline in the conversion of leucine to β-hydroxy-β-methylbutyrate in rats[J].Experimental Gerontology,2016,80:6–11.

[19] 张丽丽.脯氨酸在猪研究方面的回顾与展望[J].饲料广角,2010(7):34–35.

[20] 王小城,熊霞,杨焕胜,等.腐胺和脯氨酸对哺乳期仔猪空肠绒毛-隐窝轴上皮细胞的多胺代谢及 Wnt 信号通路的影响[J].中国农业科学,2015,48(8):1609–1615.

[21] SHI W J,MEININGER C J,HAYNES T E,et al.Regulation of tetrahydrobiopterin synthesis and bioavailability in endothelial cells[J].Cell Biochemistry and Biophysics,2004,41(3):415–433.

[22] HA E M,OH C T,BAE Y S,et al.A direct role for dual oxidase in *Drosophila* gut immunity[J].Science,2005,310(5749):847–850.

[23] URSCHEL K L,EVANS A R,PENCHARZ P B,et al.Infusion of glucagon-like peptide 2 with an arginine deficient diet increases endogenous arginine synthesis from proline in parenterally-fed neonatal piglets[J].Livestock Science,2007,108(1/2/3):41–44.

[24] MIKALAUSKAS S,MIKALAUSKIENE L,BRUNS H,et al.Dietary glycine protects from chemotherapy-induced hepatotoxicity[J].Amino Acids,2011,40(4):1139–1150.

[25] 杜瑞平,张兴夫,高民,等.甘氨酸的免疫调节作用及其分子机制[J].动物营养学报,2015,27(3):663–670.

[26] YI D,HOU Y Q,WANG L,et al.Dietary N-acetylcysteine supplementation alleviates liver injury in lipopolysaccharide-challenged piglets[J].British Journal of Nutrition,2014,111(1):46–54.

[27] QUINLAN G J,MARTIN G S,EVANS T W.Albumin:biochemical properties and therapeutic potential[J].Hepatology,2005,41(6):1211–1219.

[28] 余红心,刘丽,贾俊静,等.不同蛋白水平日粮对武定鸡生长性能及血液生化指标的影响[J].当代畜牧,2008(1):24–26.

[29] 张玲,袁旭红,段修军,等.不同粗蛋白水平日粮对仔鹅生长性能、血液生化指标和血清激素的影响[J].中国家禽,2011,33(16):29–33.

[30] 董志岩,刘景,方桂友,等.日粮蛋白质、赖氨酸水平对生长猪生产性能及蛋白质、氨基酸消化率的影响[J].家畜生态学报,2011,32(2):69–74.

[31] 蔡青和,陈远庆,LIN X,等.高温条件下降低饲粮粗蛋白质水平和添加复合酶制剂对肥育猪生长性能和氮、磷代谢的影响[J].动物营养学报,2014,26(7):1746–1752.

[32] 董志岩,叶鼎承,李忠荣,等.理想蛋白质氨基酸模式对生长猪生产性能、血清尿素氮及游离氨基酸的影响[J].家畜生态学报,2010,31(5):30–34.

[33] 董志岩,刘景,叶鼎承,等.不同低蛋白日粮添加氨基酸对生长猪生长性能及血液生化指标的影响[J].福建农业学报,2009,24(4):341–344.

[34] TACTACAN G B,CHO S Y,CHO J H,et al.Performance responses,nutrient digestibility,blood characteristics,and measures of gastrointestinal health in weanling pigs fed protease enzyme[J].Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,2016,29(7):998–1003.

[35] LIU Y Y,KONG X F,JIANG G L,et al.Effects of dietary protein/energy ratio on growth performance,carcass trait,meat quality,and plasma metabolites in pigs of different genotypes[J].Journal of Animal Science and Biotechnology,2015,6(1):36.

[36] 郑春田,李德发.猪低污染日粮技术研究进展[J].饲料工业,2000,21(12):1–5.

[37] 张敏,孟繁艳,李香子,等.猪低污染日粮技术的研究进展[J].延边大学农学学报,2002,24(4):296–299.

[38] TOLEDO J B,FURLAN A C,POZZA P C,et al.日粮中添加氨基酸降低粗蛋白含量对 6～15kg 仔猪生产性能的影响[J].饲料博览,2014(11):52.

[39] 伍力,耿梅梅,王文策,等.哺乳藏仔猪发育期血液生化指标动态变化规律研究[J].西南农业学报,2010,23(2):570–574.

[40] DANG P N,DWIVEDI N,PHILLIPS L M,et al.Controlled dual growth factor delivery from microparticles incorporated within human bone marrow-derived mesenchymal stem cell aggregates for enhanced bone tissue engineering via endochondral ossification[J].Stem Cells Translational Medicine,2015,5(2):206–217.

[41] WANG C,WANG M Q,YE S S,et al.Effects of copper-loaded chitosan nanoparticles on growth and immunity in broilers[J].Poultry Science,2011,90(10):2223–2228.

[42] 王金宝,宋春阳,陈金汉,等.BCG 不同接种途径对仔猪血清 IgG、IgM 和 IgA 含量影响的研究[J].莱阳农学院学报,1994,11(3):218–220.

[43] 侯永清,呙于明,周毓平,等.日粮蛋白质、赖氨酸、蛋氨酸及苏氯酸水平对早期断奶仔猪免疫机能的影响[J].中国畜牧杂志,2001,37(4):18–20.

Dynamic Changes of Serum Amino Acid Content and Biochemical Parameters of Weaned Piglets in Response to Dietary with Different Protein Levels

WANG Lijian[1,2] CUI Zhijie[1,2,3] HE Liuqin[1,2] YAO Jiming[4*] WU Fei[1,2] HAN Hui[1,2] FAN Wenjun[4] LI Tiejun[1,4,5*]

(1. *Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region*, *Institute of Subtropical Agriculture*, *Chinese Academy of Sciences*; *Hunan Provincial Engineering Research Center for Healthy Livestock and Poultry Production*, *Changsha* 410125, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100039, *China*; 3. *Xiangtan University*, *Xiangtan* 411105, *China;* 4. *Guangdong Wangda Group Academician Workstation for Clean Feed Technology Research and Development in Swine*, *Guangzhou* 510663, *China*; 5. *Hunan Co-Innovation Center of Animal Production Safety*, *Changsha* 410128, *China*)

Abstract： The study was conducted to investigate the dynamic changes of serum amino acid content and biochemical parameters of weaned piglets in response to dietary with different protein levels. Eighteen 35-day-old weaned barrows (Duroc×Large White×Landrace) with an average body weight of（10.0±1.0）kg were randomly divided into three groups (6 replicates in each group and 1 pig in each replicate), and fed diets

with 20% (HP group), 17% (MP group) and 14% (LP group) crude protein, respectively. Each piglet was installed a carotid artery intubation by surgery, and after 5 days of postoperative recovery, days 6 to 8 were regarded as trial period. Before fed intake and after feeding for 30, 60, 120, 180 and 300 min every day, all piglets were collected carotid artery blood, and serum amino acid contents and biochemical parameters were determined. The results showed that serum contents of free amino acids including Lys, Met, Thr, Trp, Asp, Ser, Gly and Glu had no significant difference among three groups at different time points when piglets were fed different protein level diets (P>0.05). There was a negative correlation between the contents of Lys, Met, Thr and Trp with dietary protein level. Serum contents of Val, Ile, Arg and urea in HP group were significantly higher than those in MP and LP groups at different time points (P<0.05). Serum Leu content in HP group was significantly greater than that in LP group after feeding for 120 to 300 min (P<0.05). Serum contents of total protein (TP) and albumin (ALB) as well as alkaline phosphatase (ALP) activity in LP group were significantly higher than those in HP and MP groups at different time point after feeding (P<0.05). There was no significant difference in the serum amino acid content and biochemical parameters with time flow after piglets were fed (P>0.05). The results showed that based on balancing the contents of Lys, Met, Thr and Trp, a reduction of dietary protein level by a three-percentage value remarkably decreases the contents of serum Val, Ile and Arg, but has no effects on other amino acids and related parameters; while a reduction of dietary protein level by a six-percentage value significantly decreases serum contents of Leu and urea and increases the serum contents of TP, ALB and ALP, but dose not affect other amino acids and related parameters.

Key words: protein levels; weaned piglets; amino acids; biochemical parameters

*Corresponding authors: YAO Jiming, livestock engineer, E-mail: wangdayaojiming@163.com; LI Tiejun, professor, E-mail: tjli@isa.ac.cn

(责任编辑　田艳明)